

Геометрия зоны нагрева контактного провода подвижной электрической дугой

И.А. Кондрашов, Ю.Г. Семёнов

Ростовский государственный университет путей сообщения

Аннотация: Статья посвящена исследованию проблемы нарушения взаимодействия токоприёмников электропоездов электрифицированных железных дорог с контактным проводом, сопровождающегося возникновением электрической дуги. С целью дальнейшего развития системы технической диагностики нарушений токосъёма, сопровождаемых дугообразованием, необходимо исследование характера и параметров процессов, происходящих при данных нарушениях. Основная часть статьи посвящена вопросу определения геометрических параметров области нагрева материала контактного провода движущейся электрической дугой с последующим анализом применимости полученных зависимостей и их нормированием. Полученные результаты могут быть применены для математического моделирования процессов, происходящих при нарушениях токосъёма, сопровождаемых дугообразованием.

Ключевые слова: электрический транспорт, контактная сеть, контактный провод, нарушение токосъёма, электрическая дуга, дуговой токосъём, тепловой износ, разупрочнение, диагностика.

Введение

В хозяйстве электрифицированных железных дорог одним из самых ответственных и не резервируемых элементов является контактная сеть. По нормативным документам она обязана обеспечивать бесперебойный, безотрывный и бездуговой токосъём.

Взаимодействие токоприёмника и контактной подвески является тем процессом, от условий протекания которого, во многом зависит надежность и экономичность электрической тяги на железных дорогах. Качественный токосъём определяется возможностью обеспечения плавного прохода токоприёмника по участку контактной сети с допустимыми изменениями контактного нажатия токоприёмника на контактный провод, без отрыва и без возникновения электрической дуги.

Для повышения надежности контактной сети с целью раннего обнаружения и устранения различных скрытых дефектов, порождающих дуговые нарушения, требуется развитие методов диагностирования и, как

следствие, создание систем мониторинга, позволяющих не только своевременно обнаружить устойчивые сосредоточенные дефекты, но и определить степень их опасности, тем самым установить порядок их устранения [1].

Развитие методологической базы диагностирования нарушений токосъёма с последующей разработкой критериев оценки их степени опасности является задачей комплексной и требующей решения разного рода проблем в области контактной сети на стыке с вопросами теплофизики, физики плазмы, а также вопросов оптики и излучения электромагнитных волн.

При рассмотрении проблемы термического влияния на контактный провод подвижной электрической дуги, возникающей при нарушениях токосъёма [2,3], появляются вопросы, связанные с определением области нагрева контактного провода и её границ. Потребность в более подробном изучении этого вопроса диктуется необходимостью применения исследуемых параметров для определения разупрочнения контактного провода [4] и его износа [5], а также для разработки критериев оценки степени опасности воздействия дуги на контактный провод.

Задачей исследования, представленного в данной статье, являлось получение геометрических параметров области нагрева контактного провода подвижной электрической дугой, в силу необходимости этого шага для решения комплексной задачи диагностирования дуговых нарушений токосъёма.

Геометрическими параметрами зоны нагрева контактного провода движущейся дугой являются площадь в поперечном сечении контактного провода, ограниченная изотермой определённой температуры, а также максимальная глубина линии этой изотермы, называемая её радиусом.

В основу решения поставленной задачи положен характер процесса распространения тепла в поперечном сечении контактного провода, возникшего в результате нагрева подвижной электрической дугой, рассматриваемой как подвижный источник тепла.

Полученные геометрические параметры могут свидетельствовать о степени разупрочнения или износа контактного провода, а также эти параметры ложатся в основу критериальной оценки степени воздействия электрической дуги на контактный провод.

В статье показана методика определения указанных геометрических параметров в поперечном сечении круглого, механически неизношенного контактного провода.

Особенности процесса распространения тепла от подвижной дуги

Исследуемые тепловые процессы довольно сложны с точки зрения их аналитического описания, тем не менее, существуют методы, нашедшее своё применение для описания процессов нагрева движущимися источниками теплоты. Наиболее часто используемым при математическом моделировании тепловых процессов является метод источников, зарекомендовавший себя при расчётах процессов распространения тепла при сварочных процессах [6,7], а также применённый для расчёта нагрева проводников в высоковольтных коммутационных аппаратах и контактных сетях [8-10]. Этот метод представляет собой решение дифференциального уравнения теплопроводности и позволяет получить зависимость температуры любой точки рассматриваемого тела в различные моменты времени, что делает его удобным для анализа температурных полей. В настоящее время исследования проводятся с применением одного из следующих типов источников: точечного, кругового и нормально-кругового. В связи с этим, в общем случае результатом использования метода источников становится зависимость вида:

$$T = f(R, t),$$

где $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ – радиус-вектор до рассматриваемой точки температурного поля, мм; t – время горения дуги, с.

Электрическая дуга горит в промежутке времени от 0 до t . При этом исследуемые процессы рассматриваются именно в момент времени t , что обусловлено окончанием горения дуги, и, соответственно, окончанием поступления тепла в контактный провод. Дальнейшие исследования проведены для мгновенных картин температурного поля в поперечном сечении контактного провода, получаемых в момент времени t .

Анализ температурного поля показывает, что в поперечном сечении оси контактного провода, совпадающей по направлению с осью Ox , температурное поле представляет собой семейство концентрических круговых изотерм, что было показано в работе [11] и представлено на рисунке 1.

Изотермы являются дугами окружностей радиуса r , причем центр этой окружности всегда располагается в точке, находящейся на оси Ox . В случае если температурное поле находится для сечения $x = 0$, тогда центр окружности находится в точке приложения источника тепла. Радиус r изотермы находится из соотношения:

$$r = \sqrt{y^2 + z^2}.$$

Важным замечанием является то, что при $y = 0$, радиус r принимает значение глубины z , причём это значение является максимальной глубиной по оси Oz , на которой материал контактного провода прогреет до температуры выбранной изотермы. Это также упрощает нахождение радиуса r по предварительно найденной максимальной глубине z .

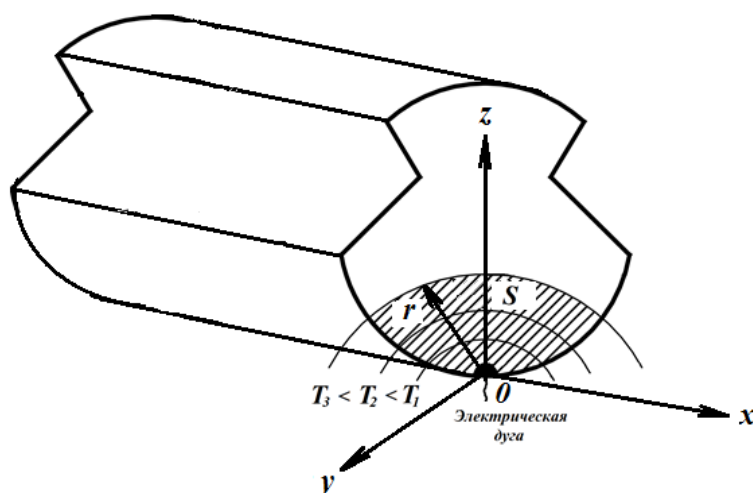


Рис. 1. – Характер распространения тепла в поперечном сечении контактного провода

Представляется интересным получение значения площади, ограниченной изотермой с некоторой определённой температурой в поперечном сечении контактного провода. Выбранная изотерма ограничивает область контактного провода, нагретую свыше температуры этой изотермы.

В работах [12,13] была предложена методика определения искомой площади с применением характерных размеров контактного провода и, по-видимому, теории подобия, однако эта методика имеет ряд ограничений, связанных со способом и точностью определения исходных параметров.

Нахождение площади зоны нагрева

Предполагается, что в качестве исходных данных принимаются:

- температура T рассматриваемой изотермы;
- определённая аналитическим или численным методами максимальная глубина z , и, как следствие, полученный радиус r при $y = 0$;
- размеры и характеристики контактного провода по ГОСТ Р 55647–2018 «Провода контактные из меди и её сплавов для электрифицированных железных дорог».

Исходя из характера процесса нагрева, искомая площадь контактного провода S , ограниченная изотермой T и нагретая до температур превышающих T , является площадью геометрической фигуры, ограниченной окружностью радиуса r и окружностью радиуса R , при этом она является суммой площадей сегментов S_1 и S_2 (рисунок 2). На рисунке 3 приведены основные обозначения, используемые при выводе далее, при этом для упрощения восприятия рисунка площади сегментов не показаны.

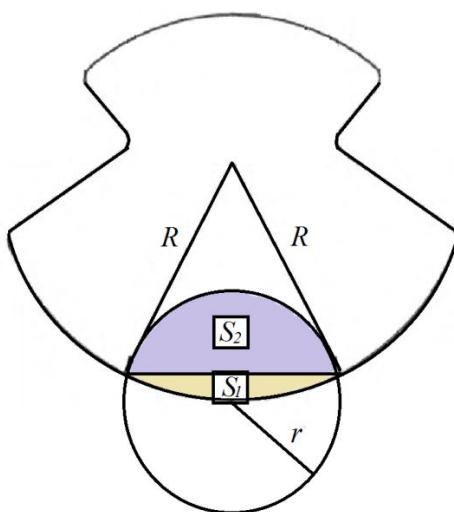


Рис. 2. – Площади сегментов, составляющих искомую площадь

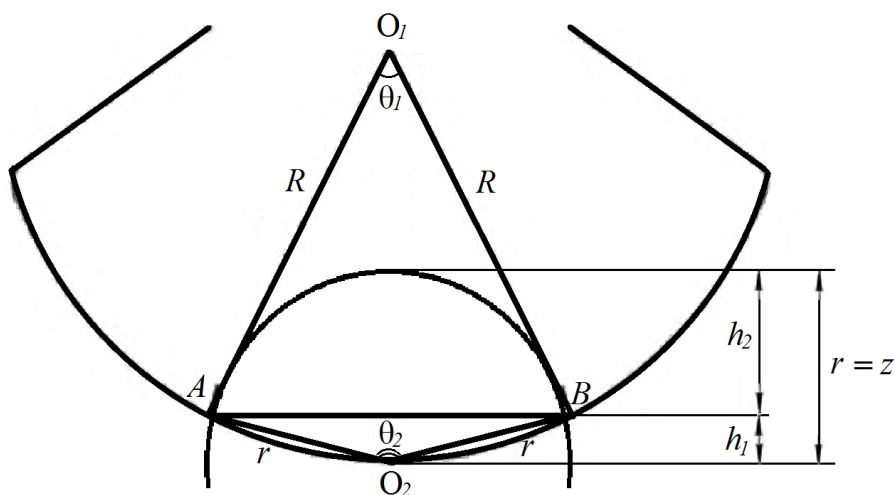


Рис. 3. – Геометрия рассматриваемой зоны нагрева

Площади сегментов S_1 и S_2 находятся по формулам:

$$S_1 = \frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot \left(\frac{\pi}{180} \theta_1 - \sin \theta_1 \right), \quad (1)$$

$$S_2 = \frac{1}{2} \cdot r^2 \cdot \left(\frac{\pi}{180} \theta_2 - \sin \theta_2 \right), \quad (2)$$

где R – радиус контактного провода по ГОСТ, мм; r – радиус окружности изотермы, мм; θ_1 и θ_2 – центральные углы окружностей радиусов R и r , соответственно, градус.

В соответствии с рисунком 3, центральные углы θ_1 и θ_2 находятся по формулам:

$$\theta_1 = 2 \arccos \left(\frac{R - h_1}{R} \right), \quad (3)$$

$$\theta_2 = 2 \arccos \left(\frac{r - h_2}{r} \right), \quad (4)$$

где h_1 и h_2 – высоты сегментов S_1 и S_2 , соответственно, мм.

Высоты сегментов h_1 и h_2 могут быть найдены следующим образом. Оба сегмента S_1 и S_2 имеют общую хорду АВ, которая связана с высотами h_1 и h_2 соотношениями:

$$AB = 2\sqrt{2Rh_1 - h_1^2}, \quad (5)$$

$$AB = 2\sqrt{2rh_2 - h_2^2}. \quad (6)$$

Приравнивая правые части уравнений (5) и (6) и принимая во внимание, что $r = h_1 + h_2$, выразим h_1 и h_2 :

$$h_1 = \frac{r^2}{2R}, \quad (7)$$

$$h_2 = r - \frac{r^2}{2R}. \quad (8)$$

Окончательно искомая площадь нагрева S , ограниченная изотермой, находится как сумма площадей сегментов S_1 и S_2 подстановкой значений из формул (3), (4), (7), (8) в следующую формулу:

$$S = \frac{R^2 \cdot \left(\frac{\pi}{180} \theta_1 - \sin \theta_1 \right) + r^2 \cdot \left(\frac{\pi}{180} \theta_2 - \sin \theta_2 \right)}{2}. \quad (9)$$

О применимости полученных результатов

Применение формулы (9) имеет ограничение в связи с тем, что форма сечения контактного провода отличается от окружности, что обуславливает существование некоторого критического значения радиуса $r_{кр}$, при котором окружность изотермы касается границ контактного провода в точках F_1 и F_2 (рисунок 4). При дальнейшем увеличении радиуса r свыше $r_{кр}$, окружность, показанная пунктиром на рисунке 4, выходит за пределы контактного провода, приводя тем самым к дальнейшей неприменимости формулы (9).

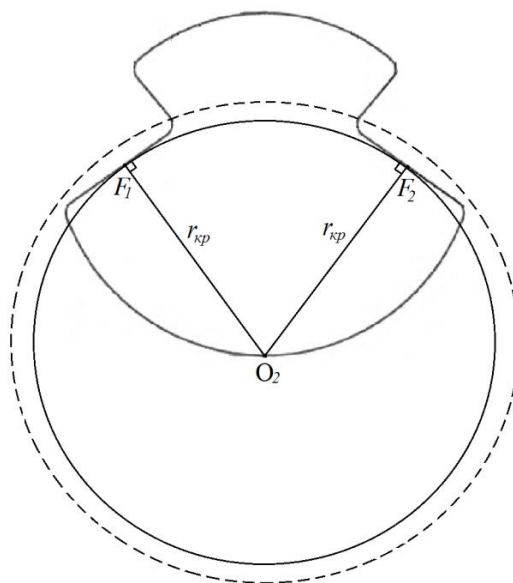


Рис. 4. – Окружность критического радиуса

Для нахождения радиуса $r_{кр}$ необходимо обратиться к рисунку 5, взятому с соответствующими размерами из ГОСТ Р 55647–2018 и на котором выполнены следующие построения:

- линия окружности радиусом $r_{кр}$ не показана для наглядности рисунка;

– касательная F_1M_1 продлевается до пересечения в точке (\cdot) D с касательной F_2M_2 ;

– точка (\cdot) E размещается на пересечении отрезка известной длины M_1M_2 с линией вертикальной симметрии, тем самым разделяя отрезок M_1M_2 на два равных отрезка $M_1E = EM_2 = 2,66$ мм.

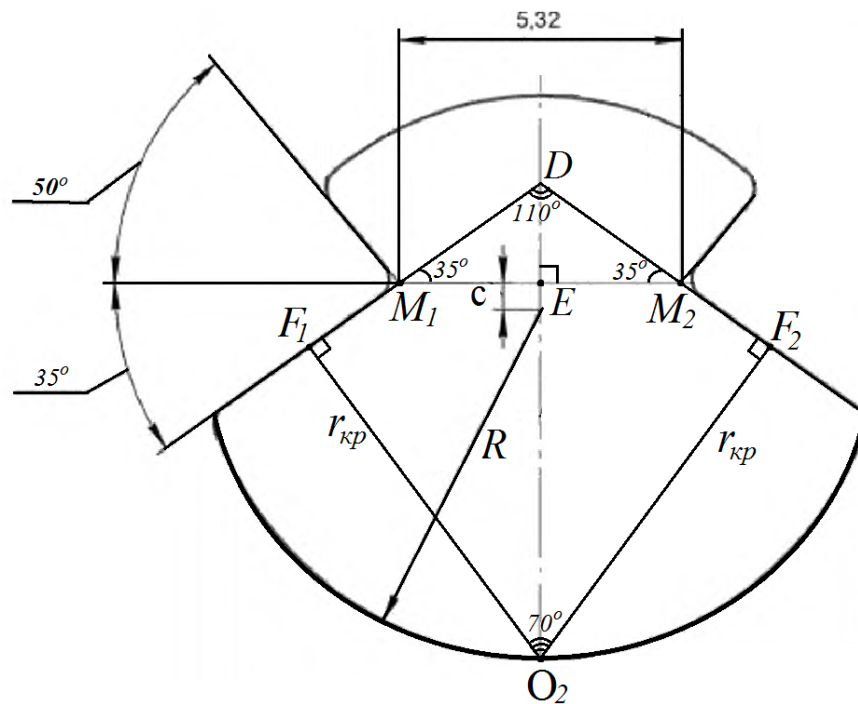


Рис. 5. – Геометрия рассматриваемого сечения для нахождения критического радиуса

Из треугольника ΔDF_2O_2 :

$$r_{кр} = O_2F_2 = DO_2 \cdot \cos 35^\circ = (R + c + DE) \cos 35^\circ. \quad (10)$$

Из треугольника ΔDM_2E :

$$DE = EM_2 \cdot \operatorname{tg} 35^\circ. \quad (11)$$

Подставляя (11) в (10) окончательно получаем:

$$r_{кр} = (R + c + 2,66 \cdot \operatorname{tg} 35^\circ) \cos 35^\circ. \quad (12)$$

Как видно, критический радиус $r_{кр}$ зависит только от размеров R и c , соответствующих марке контактного провода.

Рассчитанные значения критического радиуса $r_{кр}$ и соответствующей ему критической площади $S_{кр}$ по формуле (9) для различных марок контактного провода сведены в таблицу 1.

Таблица № 1

Значения критических величин в сечении контактного провода

Номинальное сечение провода, мм ²	85	100	120	150
Критический радиус $r_{кр}$, мм	6,55	7,37	8,27	9,58
Площадь $S_{кр}$ при критическом радиусе, мм ²	51,31	64,09	79,49	105,04

Аналогия между механическим и тепловым износом контактного провода была проведена в работе [11], в которой показано, что разупрочнение материала контактного провода вследствие теплового износа равносильно уменьшению его сечения до состояния, при котором возможен обрыв, вследствие механического износа. Оба вида износа приводят к исключению площади изношенного материала из неразупрочённой площади сечения контактного провода, тем самым увеличивается вероятность его обрыва. Однако при механическом износе площадь материала физически исключается из провода, что заметно и подлежит визуальному контролю, в отличие от теплового износа, при котором площадь визуально не исключается из провода, однако материал теряет свои прочностные свойства. Таким образом, тепловой износ может протекать без каких-либо видимых изменений сечения провода, что усложняет его мониторинг и обнаружение.

Для оценки степени теплового износа в сравнении с механическим, целесообразно использовать нормативные документы, например Правила содержания контактной сети, питающих линий, отсасывающих линий,

шунтирующих линий и линий электропередачи (в ред. Распоряжений ОАО «РЖД» от 02 августа 2017 г. №1540/р, от 16 апреля 2019 г. № 736/р), регламентирующие предельно допустимые показатели механического износа контактного провода (таблица 2).

Таблица 2

Предельно допустимые значения площади механического износа круглых контактных проводов

Наименование показателя	Значения показателей для номинальной площади сечения провода, мм ²					
	Для медных и легированных проводов				Для бронзовых проводов	
	85	100	120	150	120	150
Местный износ, мм ²	30	35	40	50	40	50
Средний износ, мм ²	25	30	35	45	35	45

Анализ таблиц 1 и 2 показывает, что предельно допустимые значения площади при механическом износе для всех марок и сечений круглых контактных проводов не превышают полученные значения критической площади $S_{кр}$, что означает применимость формулы (9) для расчёта площади нагрева материала в сечении контактного провода в диапазоне, не превышающем предельно допустимые значения.

Выводы

Полученные аналитические зависимости позволяют оценивать значение площади в поперечном сечении контактного провода, ограниченной изотермой определённой температуры, с целью дальнейшего использования в расчётах разупрочнения и износа контактного провода, а также для критериальной оценки степени опасности дуговых нарушений токосъёма.

При сравнении в отношении изношенных площадей механического и теплового износа, при эквивалентировании их разрушающего воздействия на круглый контактный провод целесообразно пользоваться предельно допустимыми показателями для механического износа, регламентированными в нормативных документах.

Применение полученных зависимостей возможно в диапазоне, не превышающем значение критической площади $S_{кр}$, причём предельно допустимые значения площади износа находятся в этом диапазоне.

Литература

1. Семёнов, Ю.Г. Основы контроля дуговых нарушений токо съёма в электротяговых сетях: Монография. – М.: ГОУ « Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2010. – 139 с.
2. Трубицин М.А., Лукашевич О.Г. Анализ способов обнаружения гололеда на проводах ЛЭП и их применение для контактной сети // Инженерный вестник Дона, 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3907/.
3. Безуглый А.В., Попова Н.А. Выбор оптимальных физических параметров режима плавки гололеда на контактной сети постоянного тока // Инженерный вестник Дона, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5382
4. Chojnowaski E.A., Cahn R.W. Annealing of shock-deformed copper // In.: Metallurgical Effects at High Strain Rates. N. J.-L., Plenum Press, 1973. – P. 631 – 644.
5. Gat M, Tabakoff W., Wakeman T. Effect of temperature on the erosion of metals // Thin Solid Films. 1979. – V.64, №2. – pp.219 – 220.

6. Волченко В.Н., Ямпольский В.М., Винокуров В.А. и др. Теория сварочных процессов: Учеб. для вузов по спец. «Оборуд. и технология сварочн. пр-ва» / Под ред. Фролова В.В. – М.: Высш. шк., 1988. – 559 с.

7. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Под ред. акад. Патона Б.Е. – М.: Машиностроение, – 1974. – 768 с.

8. Залесский, А.М. Электрическая дуга отключения. – М.Л., Госэнергоиздат, 1963. – 266 с.

9. Семенов, Ю.Г. Температурные режимы движущейся дуги переменного тока и условия появления импульсного радиоизлучения от дуговых нарушений токосъема на контактной сети // Вестник РГУПС. Ростов-на-Дону, 2015. – № 1. – С. 123 – 130.

10. Ли В.Н., Кондратьев А.И., Химухин С.Н. Построение математической модели нагрева контактного провода электрической дугой // Контроль. Диагностика. – 2005. – №8 – С.16–18.

11. Клименко С.В., Ли В.Н. Возможности диагностирования состояния контактного провода по тепловому износу // Материалы всероссийской молодежной науч. - практ. конф. «Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности» – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2018. – С. 241 – 247.

12. Ли В.Н., Клименко С.В. Способ диагностирования контактного провода электрифицированных железных дорог // Транспорт азиатско-тихоокеанского региона. – 2015. – С.26–28

13. Ли В.Н., Клименко С.В. Методика оценки термического разупрочнения контактного провода // Наука и техника транспорта. – 2015. – № 2. – С. 29-33.

References

1. Semenov, Y.G. Osnovy kontrolja dugovyh narushenij tokosjomki v jelektrotjagovyh setjah: Monografija [Fundamentals of the control of arc violations

of current collection in electric traction networks: Monograph]. M.: Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte, 2010. 139 p.

2. Trubicin M.A., Lukashevich O.G., Inzhenernyj vestnik Dona, 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3907/.

3. Bezugly A.V., Popova N.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5382

4. Chojnowaski E.A., Cahn R.W. Annealing of shock-deformed copper. In.: Metallurgical Effects at High Strain Rates. N. J.-L., Plenum Press, 1973. 631 – 644 pp.

5. Gat M, Tabakoff W., Wakeman T. Thin Solid Films. 1979. V.64, №2. pp. 219 – 220.

6. Volchenko V.N., YAmpol'skij V.M., Vinokurov V.A. i dr. Teorija svarochnyh processov [Theory of welding processes]: Ucheb. dlja vuzov po spec. «Oborud. i tehnologija svarochn. pr-va». M: Vysshaja shkola, 1988. 559 p.

7. Tehnologija jelektricheskoy svarki metallov i splavov plavleniem [Technology of electric welding of metals and alloys by fusion]. Pod red. akad. Patona B.E. M.: Mashinostroenie, 1974. 768 p.

8. Zalesky, A.M. Elektricheskaya duga otklyucheniya [Electrical arc of shutdown]. Moskva; Leningrad: Energy, 1963. 267 p.

9. Semenov, Y.G. Vestnik RGUPS. 2015. № 1. pp.123-130.

10. Li V.N., Kondrat'ev A.I., Kochetova I.V., Himuhin S.N. Kontrol'. Diagnostika. 2005. №8, pp.16–18

11. Klimenko S.V., Li V.N., Materialy vsrossijskoj molodezhnoj nauch.-prakt. konf. «Intellektual'naja jenergetika na transporte i v promyshlennosti». Omsk: Omskij gos. un-t putej soobshhenija, 2018. pp. 241 – 247.

12. Li V.N., Klimenko S.V. Transport aziatsko-tihookeanskogo regiona. 2015. pp.26–28.



13. Li V.N., Klimenko S.V. Nauka i tehnika transporta. 2015. № 2. pp. 29-33